

CONVIVIENDO CON LOS ARMÓNICOS

1. PREÁMBULO

Para empezar podríamos hacernos la pregunta: **¿En qué instalaciones no hay armónicos?**, cuya respuesta inmediata es: en ninguna.

Partiendo de esta premisa la siguiente pregunta obviamente es: ¿Cuál es el nivel de armónicos admisible?, cuya respuesta ya exige una explicación extensa.

Veamos un ejemplo: supóngase que en una instalación medimos con un analizador los siguientes armónicos en % de la tensión de red a 50Hz (1).

$$U_5 = 3,1\%$$

$$U_7 = 2,0\%$$

$$U_{11} = 0,9\%$$

$$U_{13} = 0,8\%$$

La distorsión total se puede calcular como sigue (2):

$$\text{THD (U)}: \sqrt{3,1^2 + 2,0^2 + 0,9^2 + 0,8^2} = 3,9\%$$

¿Es admisible este nivel de armónicos?

Según que aspecto consideramos será o no admisible:

- Atendiendo a las normas, por ejemplo EN 61000-2-4, relativa a niveles de armónicos admisible en la industria, el nivel citado correspondería a la clase 2 (industria "normal" con niveles de distorsión asimilables a la red pública de suministro) (3)
- Si se trata de una industria con equipos sensibles a los armónicos este nivel podría dar problemas.
- Suponiendo que las mediciones se hicieron sin ninguna batería de condensadores conectada cabe otra pregunta: ¿Qué pasa al conectar una batería de, por ejemplo, 300kvar? La respuesta ya exige conocer más datos de la instalación y hacer cálculos.

(1) Los armónicos que se indican a continuación son los característicos de redes industriales. Sus frecuencias corresponden a 250, 300, 550 y 550Hz, es decir, a armónicos de orden 5,7,11 y 13 respectivamente.

(2) Esta se calcula como $\text{THD} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2 + \dots}}{U_1}$ o bien utilizando los porcentajes como se hace en el ejemplo. Por otra parte, si calculamos como afecta este porcentaje a la tensión de red, debemos determinar el valor eficaz $U(\%) = \sqrt{100^2 + 3,9^2} = 100,08\%$, es decir, la tensión de red es tan solo un 0,08% superior a la que habría sin armónicos. Por tanto, ¿despreciable? no nos precipitemos y sigamos avanzando.

(3) Según la citada norma en clase 2 el $\text{THD}_{\text{max}} = 8\%$

Supongamos que se trata de una industria con un suministro en A.T. con un trafo de 1000 kVA, con 250 kVA en variadores de velocidad y otros receptores convencionales.

A priori podemos afirmar que lo más probable es que la batería amplifique los armónicos. Supongamos que al medir de nuevo con la batería conectada se aprecian los siguientes valores:

$$U_5 = 5,3\%$$

$$U_7 = 9,9\%$$

$$U_{11} = 0,9\%$$

El nuevo valor de distorsión sería

$$THD (U) = \sqrt{5,3^2 + 9,9^2 + 0,9^2} = 11,3\%$$

Nivel que podría afectar a equipos no tan sensibles a parte de provocar pérdidas en la red y en los receptores de la instalación y superando ampliamente los límites de la norma mencionada incluso para clase 3, donde se admite como máximo THD = 10%

Pero **¿Qué pasa con la propia batería?**

Esta absorbería corrientes armónicas que pueden calcularse por:

$$i_h = U_h \cdot h$$

Por tanto,

$$i_5 = 5,3 \times 5 = 26,5\%$$

$$i_7 = 9,9 \times 7 = 69,3\%$$

$$i_{11} = 0,9 \times 11 = 9,9\%$$

y la corriente total absorbida por el condensador contando con el 100% de su corriente nominal sería:

$$i_c = \sqrt{100^2 + 26,5^2 + 69,3^2 + 9,9^2} = 124,9\%$$

Como la batería debe soportar según normas (UNE EN 60831-1/ UNE EN 61921) un 30% de sobrecarga en corriente: no pasa nada.

Pero **¡atención!** La vida de la batería se reducirá e igual en dos años “se nos muere” (1).

Pero y si encima se dan tensiones de red a 50Hz hasta un 10% superiores y que también son admisibles para la batería, ¿qué pasaría?, que la sobrecarga sería ahora:

$$i_c = \sqrt{110^2 + 26,5^2 + 69,3^2 + 9,9^2} = 133\%$$

y por tanto inadmisibles, ahora la batería se ‘agotaría’ igual en 2 años. Pero no acaban aquí las desgracias, ya que podría sumarse otro enemigo: un exceso de temperatura ambiente con lo que no hace falta especular sobre el final: la batería ‘revienta’ seguro, excepto si es una batería Cydesa en cuyo caso se trataría de más bien de un ‘pinchazo’ seguido de una muerte tranquila.

La historia ha sido realmente trágica pero cabe recordar que la sabia naturaleza siempre acaba con su enemigo.

(1) No solamente le afectaría la sobrecarga de corriente, ya que las tensiones armónicas se superponen a la fundamental produciendo picos periódicos de tensión de valor suma ($u_c = 100 + 5,3 + 9,9 + 0,9 = 116\%$), se aumentará la probabilidad de perforación del dieléctrico de los condensadores y en consecuencia de la reducir su vida.

2. INTRODUCCIÓN A LOS ARMÓNICOS



2.1 ¿Qué son?

En el capítulo anterior hemos asistido al final de un actor principal: nuestra batería de condensadores a la que dimos por perdida al sucumbir como víctima activa de los armónicos. Por tanto, no podemos demorar por más tiempo el averiguar que son los armónicos.

Realmente se trata de un enemigo misterioso, creación matemática de Jean-Baptiste-Joseph Fourier, excelente físico y también excelente revolucionario que estuvo a punto de ser guillotinado y no precisamente por haber inventado los armónicos. Nuestro amigo Fourier demostró que esa “porquería de onda” que a veces podemos observar cuando hacemos mediciones en industrias eléctricamente contaminadas y contaminantes, fig. 2.1-1, se puede descomponer en ondas perfectamente senoidales que oscilan a frecuencias múltiples de la principal o fundamental, entre nosotros a 50Hz.

Fig. 2.1-1 Ejemplo de onda de corriente con una deformación importante debida a armónicos

2.2 ¿Qué los origina?

Al morir Fourier, Edison todavía no había nacido, por tanto no nos engañemos; Fourier no pudo imaginarse el lío que se iba a armar en el mundillo eléctrico con su invento. Hasta la década de los 60 no se empezó a hablar de variadores de velocidad estáticos en c.c. y dos décadas más tarde aparecieron los variadores de frecuencia para motores asíncronos (1). En ese momento empezaron a generalizarse los armónicos y hasta hoy, que están en todas partes: en equipos de toda índole desde electrodomésticos, ascensores, máquinas herramienta, rotativas de prensa, tuneladoras, etc.

A este batiburrillo se suman como no podría ser de otra forma, otros electrocontaminantes como los PC's, los aparatos de TV, las fotocopiadoras, ... y las lámparas de descarga como las compactas o de bajo consumo. Por tanto, el lío está servido y como dijo el genio universal Isaac Newton: “Puedo calcular el movimiento de las estrellas pero no la locura de la gente”. En este caso la locura no tiene que ver con el problema de tuvo nuestro genio pero sirve para imaginar lo que pensaría sobre el despijor con los armónicos sin haber previsto su impacto.

2.3 ¿De cuántos tipos hay?

Pues los hay para todos los gustos pero no todos son tan importantes como se creen. Los **armónicos importados** son los que se cuelan desde la red pública a nuestra instalación, su importancia depende de la potencia de la red que nos alimenta, cuanta más potencia mayor limpieza, y también de nuestros vecinos sobre todo en suministros de B.T. Así si nuestro vecino es contaminador compulsivo nos inyectará más armónicos que si se trata de un almacén de textiles chinos por ejemplo.

(1) Desde que Nikoda Tesla, ese extraño personaje que aparece echando chispas en la película El Prestigio, inventara el motor de inducción no ha habido descanso hasta conseguir regular su velocidad al menos de forma tan precisa como en los motores de corriente continua. Por tanto, la aparición de los variadores estáticos de frecuencia puede ser considerado como uno de los grandes hallazgos del pasado siglo.



En cualquier caso, los que más suelen abundar, tanto de un tipo como de otro son los de orden: 3,5,7,11... y de estos los que más nos deben preocupar son el 5,7 y algo menos el 11, cuyas frecuencias, suponiendo que no estamos en América, corresponderán a 250Hz, 350Hz y 550Hz respectivamente.

De los otros armónicos, **los armónicos exportados**, somos nosotros los culpables, se generan en nuestros equipos eléctricos y exportamos parte de ellos a la red pública.

Los primeros son los que podríamos medir cuando nuestra industria está parada y nuestros vecinos trabajando. Por tanto, y como por definición somos más trabajadores que nuestros vecinos, no hay forma de encontrar el momento de medirlos

2.4 ¿Para qué sirve el invento de Fourier?

Los cálculos eléctricos resultan muy sencillos con tensiones y corrientes que pueden representarse senoidalmente, luego si podemos descomponer por ejemplo la onda de corriente generada por un variador de velocidad en armónicos o senoides de frecuencias múltiples de la básica o fundamental de 50Hz, ¡aleluya! Problema resuelto

3. LA RESONANCIA

¿Quién no ha oído decir que cuando un batallón cruza un puente debe romper el paso?

Un puente, como cualquier otra estructura, tiene una frecuencia de resonancia, si ésta coincide con la frecuencia de las pisadas de la tropa, el puente puede romperse.

Ejemplos hay para dar y vender o quien no recuerda de su época escolar el estridente ruido de la tiza en la pizarra que por cierto tienen una solución sencilla: se parte y el trozo que queda resuena a una frecuencia más alta dentro de los ultrasonidos y se acabó la gresca. Otro caso curioso es el del ternor capaz de romper una copa con un berrido o la vibración del volante de nuestro coche cuando nos cambian los neumáticos en el taller de la esquina, los equilibra el aprendiz y circulamos a 110km/h.

En todos los casos, es necesario un elemento capaz de oscilar o resonar y un agente que vibre a una frecuencia igual a la propia del citado elemento. El elemento puede ser el puente, el vaso o el conjunto tiza-pizarra y el agente la tropa, el movimiento que arrastra la tiza o el sonido.

En electricidad la resonancia se produce en los circuitos eléctricos con inductancia y capacidad. La inductancia es propia de todas las máquinas eléctricas y líneas aéreas fundamentalmente y la capacidad, al menos las grandes capacidades, los constituyen las baterías de condensadores, según ambos elementos estén en serie o paralelo se produce los dos tipos clásicos de resonancia.

3.1 ¿Resonancia paralelo?

DIBUJ

Fig. 3-1.1 Circuito simplificado a) y equivalente para armónicos b)



En la figura un transformador alimenta a un variador de velocidad y una batería de condensadores junto con otros receptores. Para el análisis de armónicos el variador se comporta como un generador de corrientes armónicas (la fuente o agente de los ejemplos anteriores) mientras la inductancia o reactancia del trafo y los posibles receptores en paralelo junto a la reactancia capacitiva de la batería constituyen el circuito eléctrico o elemento susceptible de resonar. Como la fuente genera armónicos de orden 5,7,11... la resonancia se producirá cuando la frecuencia propia del circuito coincida con uno de estos armónicos y esta circunstancia se dará despreciando otros receptores, cuando:

$$f_0 = 50 \sqrt{\frac{100 S_T}{u_K \cdot Q_C}}, \text{ coincide o se aproxime a los armónicos citados}$$

Si retomamos el ejemplo del apartado 1, la frecuencia de resonancia sería:

$$f_0 = 50 \sqrt{\frac{100 \times 1000}{6 \times 300}} = 373 \text{ Hz}, \text{ suponiendo que la tensión de cc de trafo } u_K = 6\%$$

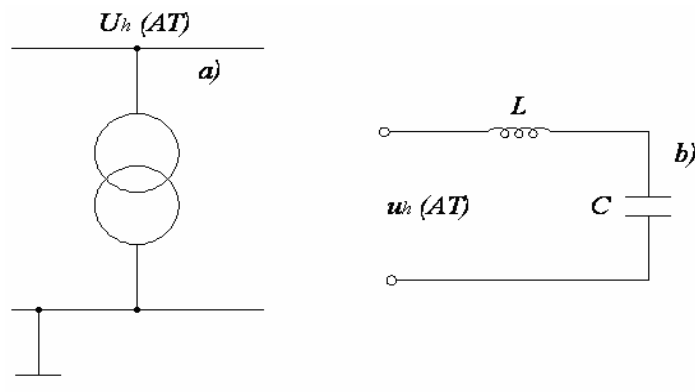
frecuencia ésta próxima al 7º armónico de 350Hz, luego amplificará sustancialmente la corriente a esta frecuencia que circulará por el trafo y la batería, sobrecargando ambos. Además, por caída de tensión aparecerán tensiones armónicas de valor considerable a 350Hz. Naturalmente, bajo el supuesto de que el variador sea de potencia apreciable.

Potencia del variador kVA	Sobrecarga de corriente en la batería %	Tensión en % del armónico de orden		
		5	7	11
50	9,3	3,6	5,7	0,2
100	12,7	4,0	6,8	0,4
200	20,4	4,9	8,8	0,7

En la tabla se muestra la evolución de dos parámetros críticos: la sobrecarga en la batería y las tensiones armónicas en barras. El límite de la potencia del variador no debería superar 50kVA y como límite estar por debajo de 100kVA. Otra alternativa sería reducir la potencia de la batería. Así por ejemplo con 100kVA en convertidores y una batería de 200kvar, la frecuencia de resonancia se situaría en 475Hz y las tensiones armónicas para los armónicos 5, 7 y 11 se reducirían a 3,9%, 2,9% y 1%, respectivamente, mientras que la sobrecarga en la batería se reduciría al 4,1%. Pero no vamos a poder modificar la potencia ni de los variadores ni la de la batería. Más adelante volveremos sobre este tema.

3.2 Resonancia serie

Un caso de resonancia serie se puede producir, por ejemplo, entre el trafo y el condensador fijo de compensación de éste para compensar su propio consumo de reactiva



Los armónicos pueden ser los aportados por la red de A.T. y/o por el propio transformador (1).

Para evitar estos inconvenientes la potencia del condensador fijo debería ser:

$$Q_C \leq 0,9 \frac{100S_T}{h^2 \cdot u_K}$$

h en este caso debería ser el armónico de mayor orden con valor apreciable, $h=11$, por ejemplo.

Así para 1000kVA de potencia del trafo con tensión de cc. del 6%: Q_C (máx.) = 123kvar

El ejemplo induce a afirmar, como suele decirse, que con valores de potencia del condensador inferiores al 10% de la potencia del transformador no hay problemas (en cuanto a la resonancia serie se refiere).

4. SOBRE CÓMO RESOLVER LA APARENTE ENEMISTAD ENTRE ARMÓNICOS Y CONDENSADORES

Como siempre, existen soluciones parciales y buenas soluciones

Volviendo al caso del apartado 3.1 y como allí se citaba: **¿podemos pedir al cliente que elimine variadores?**, pues más bien no, so pena de ser tratados de ilusos e ignorantes.

¿Podría reducirse la potencia de la batería?, en este caso nos arriesgaros a las vehementes protestas del cliente cuando reciba el cargo por reactiva en la factura de consumo eléctrico.

Otra solución es proteger la batería, por ejemplo, sobredimensionándola en tensión. Puede ser una alternativa aceptable para la batería pero no siempre para la instalación, ya que no evitamos la amplificación de armónicos y sus posibles consecuencias.

Si evitamos la resonancia o aproximaciones a ella: ¿se eliminaría el problema? Evidentemente sí y no resulta difícil. Para comprender la solución observemos el esquema de la figura 4.1-1b) (b), X_L representaría en nuestro caso una reactancia de valor apropiado para que con la reactancia capacitiva X_C de la batería tenga una frecuencia de resonancia f_0 por debajo del armónico más bajo de valor apreciable, en general el 5º (2).

(1) El transformador al estar compuesto de un núcleo magnético de comportamiento no lineal constituye él mismo una fuente de armónicos cuya amplitud se ve aumentada al aumentar la tensión primaria en periodos de baja carga.

(2) Hasta ahora se ha estado quitando protagonismo al tercer armónico y realmente no lo merece en entornos industriales. Más adelante, cobrará todo su esplendor (ver apartado 6).

4.1 ¿Cómo se comporta un circuito como el descrito?



La reactancia de tal circuito es la diferencia de las reactancias inductiva (L) y capacitiva (C), $X_F = X_L - X_C$. La primera es proporcional al orden del armónico h que se considere y la segunda inversamente proporcional al mismo.

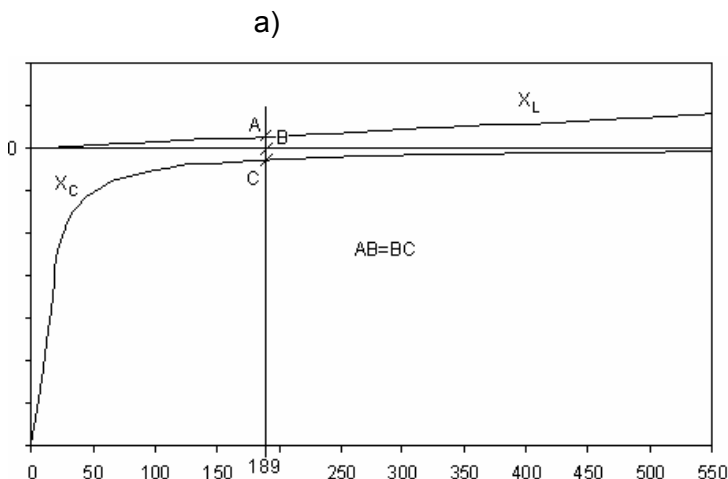


Fig. 4.1-1, circuito o filtro L-C para bloqueo de armónicos ($f_0=189\text{Hz}$)

La explicación de la fig. 4.1-1 servirá para comprender el comportamiento de un filtro L-C como el citado. A la frecuencia de red X_L tiene un valor muy pequeño comparado con X_C , luego el filtro se comporta como un condensador. A la frecuencia de resonancia del filtro, en nuestro caso hemos elegido 189Hz, ambas reactancias se igualan pero a partir de esta frecuencia $X_L > X_C$ y el filtro se comporta como una reactancia inductiva. Por tanto, a partir de este valor no es posible que se produzca ninguna resonancia con la red, ya que hemos logrado hacer desaparecer la capacidad.

Nos podemos preguntar: **¿qué pasa a la frecuencia de sintonización del filtro de 189Hz?**, la reactancia del filtro sería nula y por tanto sería como un cortocircuito a esa frecuencia, sin embargo, hemos de tener presente que no existe por definición ningún armónico de 189Hz, por tanto: **¿por qué 189Hz?**

Para optimizar el coste de una reactancia interesa un valor elevado de la frecuencia de sintonización, lo que supone menos espiras de hilo de cobre. Para ello, deberíamos acercarnos lo máximo posible a 250Hz. Pero como por otra parte el coste aumenta con la corriente que debe soportar y esta aumenta al acercarnos a 250Hz, la solución óptima se halla en un punto intermedio ni muy cerca ni muy lejos de 250Hz, es decir, en 189Hz. Por otra parte, este tipo de filtros son más “robustos”, es decir, soportan mejor altas tasas de armónicos.

4.2 ¿Qué efectos tiene un filtro de 189Hz en la red?

Podríamos decir que el efecto es de lo más saludable, ya que:

- elimina el riesgo de resonancia como ya se ha descrito
- y de propina nos absorbe de un 20% a un 40% de armónicos, básicamente de orden 5. Y eso porque presenta una reactancia baja a esta frecuencia.

En resumen, hemos logrado el objetivo de hacer frente a los armónicos: no los hemos vencido pero sí debilitado.

Claro que podríamos vencerlos con filtros sintonizados pero esto lo dejamos para mejor ocasión.



5. VERDADES Y MENTIRAS SOBRE LOS ARMÓNICOS

Si bien los armónicos pueden dar lugar a diversos fenómenos, éstos están naturalmente sometidos a las inexorables leyes de la electricidad, es decir, no cabe atribuirlos a aquello que no comprendemos por simple asociación de la incompreensión de ambos.

5.1 Los armónicos cuestan dinero

A pesar de no existir ningún tipo de penalización por inyectar armónicos a la red si que éstos producen pérdidas en receptores y líneas, y estas pérdidas son kWh que consumimos innecesariamente.

En los transformadores se producen pérdidas en vacío y en carga, siendo estas últimas las afectadas por la presencia de armónicos en la corriente del secundario y comprenden tanto pérdidas en los devanados como en el hierro (núcleo, cuba y otras partes de acero).

En los motores también se producen pérdidas similares a parte de vibraciones mecánicas.

En consecuencia podríamos decir que los armónicos son caros de mantener y por tanto no está de más evitarlos y si esto no es posible será mejor eliminarlos. Todos estos efectos contribuyen además a reducir la vida de las máquinas.

En las líneas o cables eléctricos causan también pérdidas por el aumento del valor eficaz de la corriente y por acentuar el efecto skin, traducido al castellano, efecto pelicular (no parece que exista ningún Lord Skin a quien atribuir el descubrimiento) (1). Ese fenómeno produce un aumento de la resistencia de los conductores al reducir la sección de paso de la corriente al concentrarse ésta en la periferia del conductor.

5.2 ¿Son ruidosos los armónicos?

Podríamos decir que no solo son ruidosos sino que también producen temblores por donde circulan, ¿será el motivo del miedo a los armónicos? De todos modos son conocidas las vibraciones de núcleos de chapa magnética en transformadores y motores, vibración y zumbido inversamente asociado a la calidad de la máquina y directamente a la abundancia de nuestros molestos compañeros: los armónicos. Los armónicos son capaces de crear oscilaciones mecánicas si su interacción con el campo magnético fundamental es capaz de excitar una resonancia mecánica.

Los cables tendidos por ejemplo sobre una bandeja pueden ofrecer tonos que recuerdan una “molesta” melodía de Rimsky-Korsakov.

5.3 Los armónicos provocan el disparo de interruptores automáticos, la fusión de fusibles, la desconexión de diferenciales y más fenómenos que inducen a algún electricista a cambiar de profesión

Las corrientes armónicas pueden ser la causa de disparos intempestivos o de la fusión de fusibles sin causa aparente. En estos casos no solo influye el aumento del valor eficaz de la corriente y el calentamiento por efecto pelicular sino también la frecuencia de los armónicos más destacados. Así puede producirse el disparo de un interruptor automático aunque no se alcance el valor de la corriente de disparo.

(1) Pero si a Lord Kelvin quien fue el primer presidente de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) fundada en 1906.

En los fusibles puede incluso producirse la explosión del cartucho.



En cuanto a los diferenciales, para que engañarnos, son bastante raros pero no disparan sin causa, si lo hacen es porque se producen fugas a tierra no por los armónicos en si mismos.

Las fugas a tierra pueden producirse por defectos de aislamiento y por corrientes capacitivas debidas a las capacidades de las propias líneas respecto a tierra o por condensadores de filtros de determinados dispositivos (reactancias electrónicas y PCs por ejemplo). Las tensiones armónicas al ser de frecuencia superior a la de la red se encontrarán reactancias capacitivas más bajas y por tanto corriente de fugas a tierra más altas que pueden contribuir a disparos más frecuentes. Así cuando se alimenta a receptores con líneas de gran longitud y además estos descargan a tierra la basura de algunos de los apartados mencionados (corrientes de AF generalmente) ya tenemos al electricista de mantenimiento con ganas de cambiar de profesión.

¿Existe solución a estos problemas?, en parte si pero hay que actuar metódicamente:

1º) Limitar el número de circuitos por un mismo diferencial

2º) Utilizar diferenciales tipo A inmunizados o superinmunizados (**SI**) (1)

y si estas medidas fueran insuficientes utilizar filtros de armónicos.

5.4 Los armónicos empeoran el factor de potencia

Antes debemos de precisar que el factor de potencia no es igual al $\cos\phi$, el cual deberíamos llamar factor de desplazamiento en redes con armónicos. Así el factor de potencia (FP) debe de expresarse por:

$$FP = \lambda \cos\phi$$

Siendo $\lambda = \frac{I_1}{I}$, el cociente entre la corriente fundamental y eficaz del circuito en cuestión. Por supuesto, si no fuera por esos pícaros armónicos $I_1 = I$ y por tanto $\lambda = 1$ y $FP = \cos\phi$ como toda la vida se ha venido diciendo.

La afirmación, por tanto, es correcta y los armónicos si bien no afectan al $\cos\phi$ sí empeoran el factor de potencia ya que la corriente eficaz en estos casos es superior a la fundamental.

Así mejorar el FP en receptores no lineales supone en la mayoría de casos reducir las corrientes armónicas producidas. Este sería por ejemplo el caso de las lámparas fluorescentes con reactancias electrónicas puestas como ejemplo en el siguiente apartado, puesto que su $\cos\phi = 1$, es decir no consumen energía reactiva.

Es conveniente recordar que un FP bajo implica reducir la potencia aparente disponible en una red y por tanto infrutilizar transformadores y líneas.

6. EL TERCER ARMÓNICO ES BASTANTE PECULIAR Y CAUSA PROBLEMAS EN EL CONDUCTOR NEUTRO

Efectivamente se trata de armónicos triales que a la más mínima oportunidad se juntan en el neutro para sumar fuerzas.

Para comprender su comportamiento revisemos algunos de nuestros conocimientos básicos.

(1) La inmunización se consigue con filtros que bloquean las frecuencias altas, ya que estas prácticamente no afectan al cuerpo humano. Pero este no es el caso de muchos armónicos, cuyas frecuencias son bajas, y por tanto el diferencial puede limitar pero no eliminar el paso de la mayor parte de armónicos.

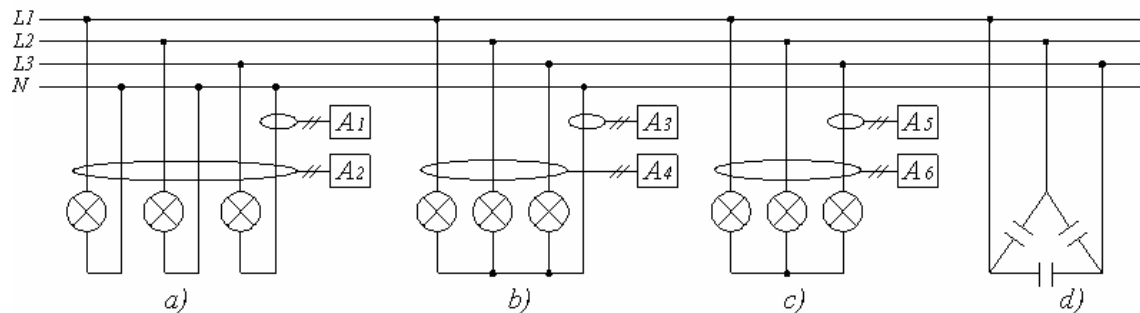


Fig. 6-1 Diferentes montajes:

- a) conexión independiente
- b) con neutro común
- c) sin neutro
- d) receptor trifásico lineal en triángulo

Supongamos que las lámparas de la fig. 6.1 son de incandescencia y por tanto no productoras de armónicos. Si son de igual potencia la corriente que absorben será igual en las tres fases si bien desfasadas en 120° . Por tanto, los amperímetros **2, 4 y 6** así como el **3** indicarán cero, ya que la corriente del neutro será nula. El **1** y **5** indicarán el mismo valor correspondiente a la corriente absorbida por una lámpara.

Sustituyamos las lámparas incandescentes por lámparas fluorescentes equipadas en aras de la modernidad con reactancias electrónicas (2), la corriente absorbida podrá contener los siguientes armónicos significativos:

Orden del armónico	Corriente en % de la fundamental
3	29
5	9
7	5

Esto significa que si la corriente fundamental por lámpara es de 100 mA, también tendremos que contemplar armónicos de 29 mA, 9 mA y 5 mA de los respectivos armónicos.

Revisemos de nuevo los circuitos de la fig. 6.1

a) Conexión con neutros independientes

Tanto por la fase como por los neutros circulan todas las corrientes mencionadas con un valor eficaz que mediría el amperímetro **1** de:

$$I = \sqrt{100^2 + 29^2 + 9^2 + 5^2} = 105 \text{ mA}$$

Al igual que en el caso de las lámparas de incandescencia el amperímetro **2** marcará cero.

b) Conexión con un conductor neutro común

Por las fases circulará la misma corriente que en el caso anterior, es decir, los 105 mA. Por el neutro circularán 87 mA cuando cabría esperar cero amperios si se tratara de lámparas incandescentes.

(2) Aun sin este tipo de reactancias sería válido lo expuesto a continuación



¿Qué ha sucedido?: que los terceros armónicos de cada fase se han juntado sumando fuerzas, en el neutro ($3 \times 29 \text{ mA} = 87 \text{ mA}$). La explicación resulta más sencilla de lo que parece; si nos atrevemos a hacer un dibujo, y para ello no hacen falta las facultades de un Leonardo, pues basta con lo que aprendimos de “dibujo lineal” en la escuela (1), nos daremos cuenta que los terceros armónicos están en fase y por eso se denominan homopolares (2). El comportamiento es similar a lo que sucedería si conectáramos las 3 lámparas de la fig. 6.1b a una misma fase. En este caso la corriente del neutro sería también la suma de la corriente de los 3 conductores, en este caso tanto de la fundamental como del 3er armónico.

$$\begin{aligned}i_{R3} &= I_3 \text{ sen } 3\omega \\i_{S3} &= I_3 \text{ sen } 3(\omega - 120) = I_3 \text{ sen } (3\omega - 360) = i_{R3} \\i_{R3} &= I_3 \text{ sen } 3(\omega + 120) = I_3 \text{ sen } (3\omega + 360) = i_{R3}\end{aligned}$$

Análogamente se puede comprobar que también coincidirán en fase los armónicos múltiplos de 3 como: 6, 9, 12, 15, ... si bien solo los impares, a los que los expertos suelen denominar “triplen”, son dignos de mención por su presencia en las redes eléctricas.

Es de suponer que alguien se pregunte:

¿Qué suerte han corrido el resto de armónicos?

Pues bien al igual que las corrientes a 150Hz también se puede comprobar por el método del “dibujo lineal” que al sumar las corrientes de cada fase también se anulan (3), luego “cero” en el neutro. Llegado a este punto podemos empezar a comprender porque un conductor desconocido como el neutro ha adquirido fama gracias al tercer armónico.

6.1 ¿Cuál debe ser la sección del neutro?

En primer lugar tratemos de estimar la máxima corriente del neutro conociendo la de las fases. Si se trata de una red equilibrada, la corriente del neutro estará exclusivamente compuesta por nuestro ya conocido tercer armónico igual a la suma de sus colegas de las fases, por tanto:

$$I_N = 3 I_3$$

Y la corriente de fase será:

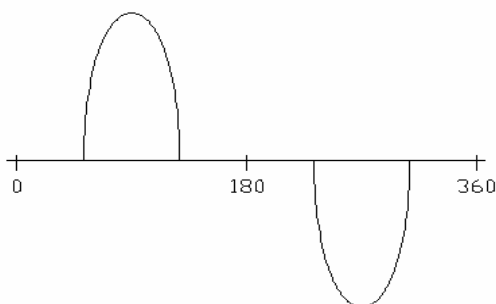
$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots}$$

Ahora elijamos a la madre de los armónicos: **la fuente de alimentación conmutada**, cuya forma de onda y armónicos generados se muestra en la fig. 6.1-1 calculemos las corrientes de fase y neutro de una supuesta línea equilibrada alimentando fuentes de este tipo.

(1) Para ello dibujemos las tres corrientes fundamentales con sus desfases de 120° y superpongamos las tres corrientes del tercer armónico desfasadas igualmente 120° y en fase con las fundamentales. ¡Sorpresa! las tres corrientes armónicas están en fase y por tanto se suman aritméticamente en el neutro.

(2) Otra forma de comprobar lo dicho para los espíritus inquietos con inclinación matemática es expresar formalmente las corrientes armónicas que circulan por cada fase:

(3) Excepto los múltiplos de 3 (ver nota 2 en esta misma página)





Orden del armónico	% respecto a I_1 (a 50Hz)
3	81
5	61
7	37
11	16

Fig. 6.1-1. Corriente absorbida por una fuente de alimentación conmutada típica
a) forma de onda
b) armónicos más significativos (según IEEE std 519)

La corriente del neutro será:

$$I_N = 3 \times 81 = 243\%$$

y de la fase:

$$I = \sqrt{100^2 + 81^2 + 61^2 + 37^2 + 16^2} = 148\%$$

luego la corriente del neutro será $243/148 = 1,64$ veces la correspondiente de los conductores de fase. Por tanto, es razonable la común recomendación de que en instalaciones donde predominen este tipo de receptores, por ejemplo, edificios de oficinas, se tome la **sección del neutro = doble de la sección de fase**. En general y descartando casos extremos, la sección del neutro deberá tomarse igual a la sección de fase y además se protege contra sobrecargas como si se tratara de un conductor de fase.

c) ¿Dónde está la tribu?

Einstein decía que cada día sabemos más y entendemos menos. ¿Puede desaparecer voluntariamente?, evidentemente no. No se les ve porque no salen, ya que no pueden circular al quitarles el camino de regreso.

Pero el empeño inútil por circular provoca un aumento de tensión armónica en los terminales de las lámparas y entre el punto de estrella y tierra (1). Fenómeno similar al que provoca un trazo de corriente al dejarlo con el secundario abierto. Por si alguien tiene la feliz idea de eliminar el neutro acabamos de comprobar algunos problemas aparte de que perderíamos la referencia de tensión del neutro también para la tensión fundamental con el consiguiente desequilibrio de tensiones.

(1) Imaginemos en la fig 6.1b. colocamos una impedancia Z_N en el neutro cuyo valor vamos aumentando, la corriente que circulará por el neutro irá disminuyendo al tiempo que la tensión U_N irá aumentando. Si llegamos a hacer Z_N muy grande se asimilará a la falta del conductor neutro; I_N será prácticamente nula y U_N alcanzará un valor considerable.

Podríamos intentarlo con un montaje en triángulo pero entonces los terceros armónicos circularían felizmente por el triángulo como en una atracción de feria (2).



Por tanto, será mejor que dejemos las cosas como están e intentemos buscar remedios paliativos, lo cual deberemos dejar para un próximo episodio.

d) Condensador trifásico

Como remate está el caso de un receptor trifásico, en este caso, un condensador conectado como es habitual en triángulo a la misma línea que las lámparas fluorescentes. Si la red está equilibrada no circularán los terceros armónicos por el condensador, sólo en caso de desequilibrio podrán medirse estas corrientes en las ramas del triángulo. Esta es una de las razones por la que estos armónicos no suelen sobrecargar los condensadores.

7. ¿SE PUEDE FRENAR LA POLUCIÓN ARMÓNICA?

En esta última década se ha ido produciendo gran cantidad de reglamentos y normas para parar los pies a los responsables de polucionar la red eléctrica, es decir, los culpables de deteriorar la onda eléctrica. Pero ¿quiénes son los culpables? y ¿cómo plantar les cara?

Paradójicamente en muchos casos víctima y culpable son una misma cosa o un mismo individuo.

Un usuario conectado a la red eléctrica puede considerar culpable de sus problemas a la Compañía Eléctrica por suministrarle energía eléctrica de mala calidad: oscilaciones de tensión, interrupciones, onda de tensión deformada por armónicos, etc. Pero al mismo tiempo este mismo usuario puede ser en parte culpable de provocar este deterioro por conectar a la red equipos contaminantes. Por tanto, esos equipos son culpables y muchas veces víctimas de esta mala calidad.

Así pues, las normas han tenido que contemplar esta situación legislando sobre la emisión de o la inmunidad a toda esta clase de perturbación entre las que cabe una especial mención a los armónicos. A esto es lo que se ha bautizado con el rimbombante nombre de Compatibilidad Electromagnética (CEM).

En 1989 apareció la directiva 89/336/CEE sobre estas materias, norma exigible en el marcado CE de aparatos. Actualmente, la directiva en vigor es la 2004/108/CE del 15/12/2004. La directiva sobre CEM ha supuesto, como era de esperar, un gran impulso y concienciación en la adopción de medidas correctoras a este tipo de problemas.

Bajo los criterios antes mencionados se han publicado las normas CEI (EN) de la serie 61000, cuya parte 2, trata del entorno o se las redes, mientras que la 3 lo hace de los límites de emisión y la inmunidad.

(2) Esto es lo que sucede en los transformadores en conexión Dy (primario en triángulo y secundario en estrella) como se representa en la fig.6.1-2 Las corrientes inducidas en el primario quedan atrapadas en los devanados y no son transmitidas a la red de A.T.



Así, la norma UNE-EN 61000-2-2 indica los niveles de armónicos admisibles en las redes de BT, de los que destacan:

Orden del armónico	Un/U ₁
3	5
5	6
7	5
11	3,5
13	3
THD <8%	

Como ya hemos comentado estos valores deben de considerarse como valores máximos ya que la realidad es en este caso y afortunadamente mejor que la ficción.

Los límites propuestos por IEEE 519 son en general más realistas con una distorsión del 5% y un máximo para un armónico individual del 3% para redes de baja y media tensión hasta 69kV

En lo que respeta a los límites de emisión de equipos destacamos: UNE-EN 61000-3-2 para aparatos trifásicos o monofásicos de pequeña potencia hasta una corriente por fase de 16A, comprende herramientas portátiles, aparatos de iluminación (como las reactancias electrónicas) y otros como los televisores.

Por otra parte, existe la UNE-EN 61000-3-4 para equipos de potencia superior a conectar también en redes de baja tensión, sin embargo esta norma todavía no está definitivamente aprobada.

Resumiendo:

- Podemos reclamar a la Compañía en base a lo establecido en la 61000-2-2
- Los equipos de hasta 16A están sujetos a normas.
- Los equipos de mayor potencia como son generalmente los variadores de velocidad de c.a. seguirán por ahora sin más limitación que el buen criterio de fabricantes y usuarios.

CYDESA
Jacinto López Melendo
j.lopez@cydesa.com